

### Список использованных источников

1. Davenport W.G., King M., Schlesinger M., and Biswas A.K. Extractive metallurgy of copper, fourth edition. – Oxford: Elsevier Sci. Ltd., 2002. – 481 p.
2. Biswas A.K., Davenport W.G., King M., and Schlesinger M. Extractive metallurgy of copper. – Oxford. Pergamon, 1996. – 460 p.
3. Gerlach J., and Herfort P. The Rate of Oxygen Uptake by Molten Copper // Metal. 1968. 22 (11). P. 1068–1090.
4. Жуков В.П., Спитченко В.С., Новокрещенов С.А., Холод С.И. Рафинирование меди. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 317 с.
5. Жуков В.П., Скопов Г.В., Холод С.И. Пирометаллургия меди. – Екатеринбург: УрО РАН, 2016. – 632 с.
6. Агеев Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 108 с.
7. Краснов М.П., Киселев А.И., Макаренко Г.И. и др. Вся высшая математика. Том 6. Вариационное исчисление, линейное программирование, вычислительная математика, теория сплайнов. – М.: Либроком, 2013. – 256 с.
2. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применение. – М.: Мир. 1980. – 456 с.
3. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. – М.: Мир. 1998. – 575 с.
4. Лунгу К.Н. Линейное программирование. Руководство к решению задач. – М.: Физматлит, 2005. – 128 с.
5. Лунгу К.Н., Норин В.П., Письменный Д.Т. Сборник задач по высшей математике. – М.: Айрис-пресс, 2011. – 592 с.
6. Vanderbei R.J. Linear Programming. Foundations and Extensions. – Berlin: Springer, 2007. – 464 p.
7. Venkata Rao R., Kalyankar V.D., and Waghmare G. Parameters optimization of selected casting processes using teaching-learning-based optimization algorithm // Applied Mathematical Modelling. 2014. Vol. 38, No. 23. P. 5592–5608.
8. Huijun F., Lingen Ch., Zhihui X., Zemin D., and Fengrui S. Eeneralized constructal optimization for solidification heat transfer process of slab continuous casting based on heat loss rate // Energy. 2014. Vol. 66. P. 991–998.

УДК 669.162.22–52

**М. Ю. Ширшов<sup>1</sup>, В. Г. Дружков<sup>1</sup>, И. Е. Прохоров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ДУТЯ ПО ФУРМАМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

#### Аннотация

*Рассмотрены варианты подвода горячего дутья к «кольцевому» воздухопроводу, и геометрии фурменных приборов, как одна из причин неравномерного распределения дутья по фурмам доменных печей. Предложены рациональные сопряжения «прямого» воздухопровода с «кольцевым», а также рациональные сочетания конструкции узла подвода горячего дутья к «кольцевому» и вывода его из кольцевого воздухопровода в фурменные приборы, при реализации которых неравномерность распределения дутья будет минимальна.*

*Ключевые слова: печь доменная, подача горячего дутья в горн, «кольцевой» и «прямой» воздухопроводы, равномерность распределения горячего дутья по фурмам, геометрия фурменных приборов, узел подвода.*

### **Abstract**

*The alternatives of a hot blast supplying for a «circulating» duct and geometry of a tuyere apparatus as one of the reasons for non-uniform hot blast distribution were discussed. Rational transition of a «direct» duct to the «circulating» one and rational combination of hot blast unit construction to the «circulating» duct and its removal from the duct to the tuyere apparatus thus compensating the non-uniform hot blast distribution were offered.*

*Keywords: a blast furnace, the supply of hot blow for the hearth, «circulating» and «direct» ducts, the uniformity of hot-blast distribution in tuyeres, geometry of a tuyere apparatus, a supplying unit.*

Равномерное распределение газов по окружности доменной печи является одним из условий, определяющих высокую эффективность доменной плавки. Неравномерность распределения горячего дутья по фурмам снижает технико-экономические показатели работы доменной печи [1–4].

Причинами образования такой неравномерности могут быть [1–4]:

- односторонний подвод горячего дутья под прямым углом к кольцевому воздухопроводу, в результате чего расход его на фурмах в секторах ввода и диаметрально противоположных ему выше;

- подвод дутья к кольцевому воздухопроводу в двух местах сверху увеличил количество секторов с повышенным расходом дутья по фурмам. Такая схема подвода была реализована на доменной печи № 9 полезным объемам 5037 м<sup>3</sup> «Криворожстали» и доменной печи № 5 с полезным объемом 5580 м<sup>3</sup> «Северстали» [4];

- разная газопроницаемость материалов в надфурменных зонах из-за неравномерного окружного распределения шихты;

- изменение сечения фурм при зарастании их шлаком;

- работа печи с перекосом поверхности засыпи шихты на колошнике;

- искажение профиля печи в связи с излишним разгаром футеровки (в секторах над чугунами и шлаковыми летками), образованием настывей и гарнисажа излишней толщины;

- неполное смешивание горячего и холодного воздуха при работе смесительного клапана;

- разные величины архимедовой силы по секторам горна на выпуске, а значит и скорости схода и разрыхленности материалов;

- геометрия фурменных рукавов, попадание в конфузторы фурменных приборов фрагментов огнеупорных изделий при частичном разрушении камеры горения воздухонагревателей и воздухопровода горячего дутья.

Удалось выявить новые причины неравномерного распределения дутья по фурмам. Например, место врезки в кольцевой воздухопровод устройства для взятия печи «на тягу», которое создает дополнительную турбулентность потока горячего дутья в этом секторе.

Повышение равномерности распределения дутья по фурмам будет способствовать лучшему использованию тепловой и химической энергий газа.

Исследования показали, что не менее эффективным может быть совершенствование конструкции узла подвода горячего дутья к кольцевому.

На кафедре «Металлургия черных металлов» (МЧМ) МГТУ им. Г.И. Носова была поставлена задача изучить влияние подвода горячего дутья к кольцевому воздухопроводу доменной печи по одному из трех вариантов, в зависимости от конкретных условий:

- первый вариант (рисунок 1, а) односторонний подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу доменной печи, выполненный перпендикулярно, при этом диаметры кольцевого и прямого воздухопроводов одинаковы;

– второй вариант (рисунок 1, б) односторонний подвод дутья к кольцевому воздухопроводу доменной печи, выполненный не перпендикулярно, а тангенциально (по касательной), при этом диаметры кольцевого и прямого воздухопроводов одинаковы;

– третий вариант (рисунок 1, в) двусторонний подвод дутья (с двумя местами врезки в диаметрально противоположных направлениях) к кольцевому воздухопроводу доменной печи, выполненный не перпендикулярно, а тангенциально (по касательной), при этом диаметры кольцевого и прямого воздухопроводов одинаковы.

Работы проводились в лаборатории физического моделирования доменного процесса на круглой, разъемной модели доменной печи, с полезным объемом ( $V_{\text{п}}$ ) 3200 м<sup>3</sup>, выполненной из оргстекла в масштабе 1:50 (без загрузки и с загрузкой шихтовых материалов), с перпендикулярным и тангенциальным подводами прямого воздухопровода горячего дутья к кольцевому, при этом диаметры кольцевого и прямого воздухопроводов одинаковы. Сыпучей средой служила смесь шамотной (фракции 0,8–1,8 мм) и агломерационной (фракции 0,85–1,6 мм) крошек, с насыпной плотностью 1,325 г/см<sup>3</sup>. На модели в кольцевой воздухопровод подавался холодный воздух ( $t \approx 22^\circ\text{C}$ ) с помощью лабораторных воздуходувок. Скорость истечения дутья из патрубков воздуходувки и через фурмы определяли с помощью термоанемометра ТТМ–2–01.

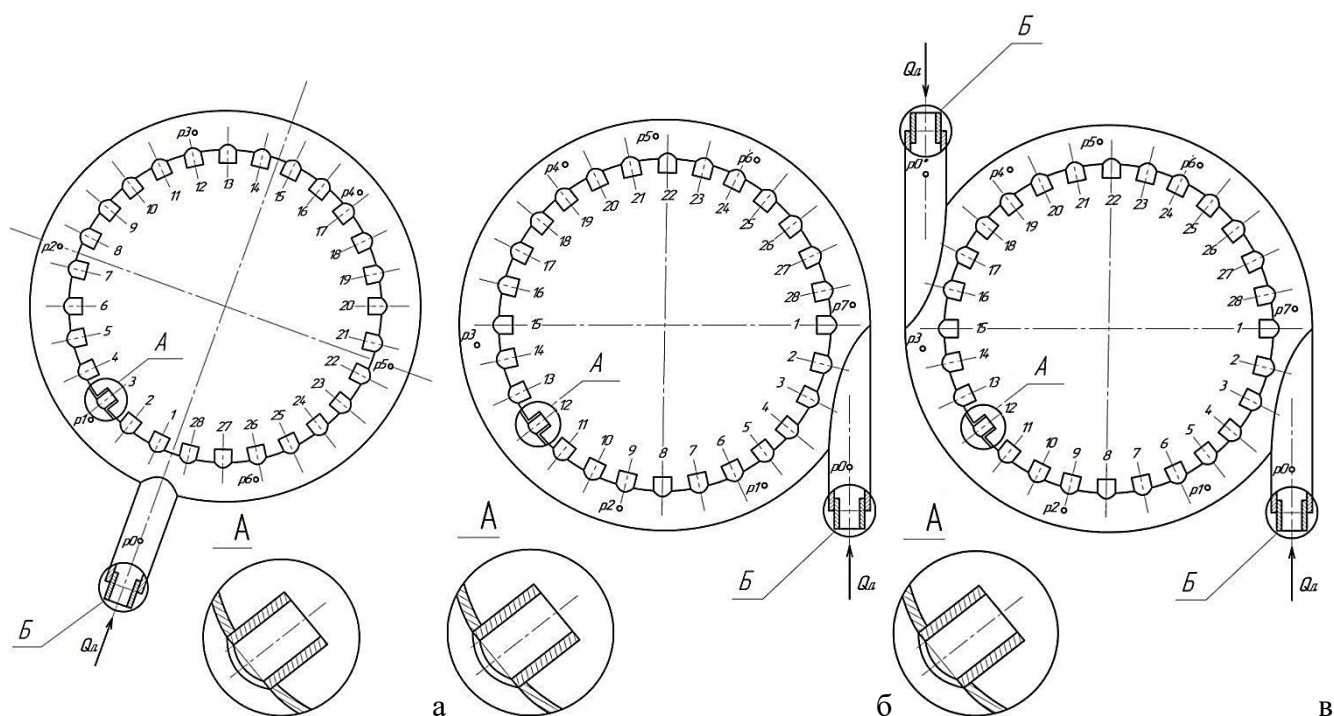


Рис. 1. Общий вид кольцевого воздухопровода на модели доменной печи  $V_{\text{п}}=3200 \text{ м}^3$  (М 1:50): 1–28 – фурменные приборы;  $p_0, p_0' - p_7$  – отверстия для отбора статического давления;  $Q_d$  – подача дутья

В ходе исследования на физической модели доменной печи проведена серия экспериментов, которые в целом можно разделить:

- исследования равномерности распределения дутья по фурмам без загрузки шихтовых материалов;
- исследование распределения полного давления по кольцевому воздухопроводу с загрузкой шихтовых материалов;
- компьютерное моделирование потоков дутья.

При одностороннем перпендикулярном подводе (скорость дутья из патрубка воздуходувки 30 м/с) среднее значение скорости ( $v_{\text{ср.}}$ ) составило 17,3 м/с, максимальное отклонение от среднего значения ( $\delta$ ) 5,9 %; при одностороннем тангенциальном подводе (скорость дутья из патрубка воздуходувки 30 м/с)  $v_{\text{ср.}}=17,4 \text{ м/с}$  и  $\delta=3,6 \%$ ; при двустороннем

тангенциальном подводе (скорость дутья из патрубка воздухоудвки 25 м/с)  $v_{\text{ср}}=27,1$  м/с и  $\delta=2,7$  %.

При одностороннем перпендикулярном подводе среднее значение давления ( $p_{\text{ср.}}$ ) составило 5,13 кПа, максимальное отклонение от среднего значения ( $\delta$ ) 1,88 %; при одностороннем тангенциальном подводе  $p_{\text{ср.}}=5,26$  кПа и  $\delta=1,67$  %; при двустороннем тангенциальном подводе  $p_{\text{ср.}}=4,41$  кПа и  $\delta=1,51$  %.

При одностороннем тангенциальном подводе дутья полное давление выше. Объясняется это тем, что при таком способе ввода дутья, поток, попадая в кольцевой воздухопровод, не встречая на своем пути препятствий, скользит по нему, увеличивая скорость движения и динамическое давление. В результате снижается статическое давление и расход дутья по фурменным приборам на участке ввода и диаметрально противоположного ему. Происходит закручивание потока, что позволяет поддерживать стабильность динамического напора и скорости движения потока дутья.

Другой методикой изучения движения потоков дутья в кольцевом воздухопроводе является компьютерное моделирование. На основании физической модели была разработана компьютерная модель (учитывались размеры), которая позволила изучить движение потоков дутья в кольцевом воздухопроводе.

После того, как были произведены расчеты, были сформированы поля скоростей, изображенных на рисунках 2а–2в.

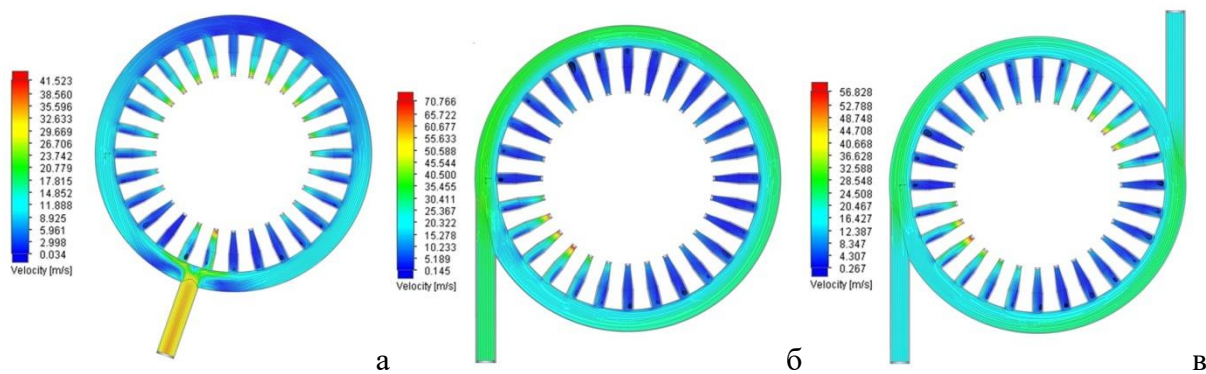


Рис. 2. Поля скоростей

При перпендикулярном подводе видно, что поток ударяется о стенку кольцевого воздухопровода, разбивается на два потока, при этом снижается скорость, увеличивается статическое давление (см. рисунок 2а).

В отличие от перпендикулярного подвода, при тангенциальном подводе, поток, не встречая на своем пути препятствий, продолжал двигаться по кольцевому воздухопроводу, при этом средние скорости и динамическое давление были значительно выше (см. рисунок 2б).

Тоже самое происходило и при двустороннем тангенциальном подводе. Создаются в кольцевом воздухопроводе два последовательно направленных друг за другом потока. Поддерживается при этом их взаимное ускорение (см. рисунок 2в).

В реальных условиях прямой воздухопровод соединяет между собой блок воздушонагревателей (3–4 штуки) и доменную печь. Блок воздушонагревателей обычно располагается с одной стороны, поэтому двусторонний тангенциальный подвод горячего дутья, как на модели доменной печи (см. рисунок 1б) реализовать невозможно. Предложена конструкция, представленная на рисунке 3, в которой прямой воздухопровод снабжен V-образной вставкой, одна ветвь которой напрямую соединена с входным отверстием одного патрубка кольцевого воздухопровода, а вторая ветвь указанной вставки выполнена удлиненной, в виде изогнутой по форме кольцевого воздухопровода наружной трубы, соединенной с входным отверстием другого патрубка.

На данное устройство для ввода горячего дутья получен патент № 158168 [5].

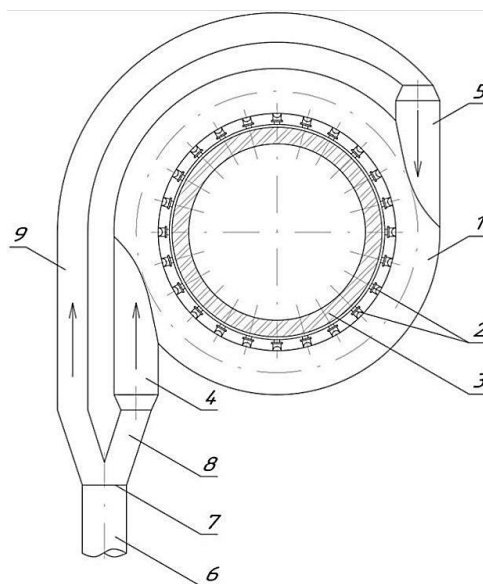


Рис. 3. Устройство для ввода горячего дутья в доменную печь:

1 – кольцевой воздухопровод горячего дутья; 2 –фурменные приборы; 3 – доменная печь;  
4, 5 – патрубки; 6 – прямой воздухопровод; 7 – V-образная вставка; 8,9 –ветви

Рассмотрены различные варианты подвода горячего дутья к кольцевому воздухопроводу, сочетания узла подвода горячего дутья в кольцевой и вывода его в фурменный прибор.

На рисунке 4 показаны узлы подвода горячего дутья к кольцевому воздухопроводу при различном угле наклона прямого воздухопровода к горизонту, а также геометрия фурменных приборов на действующих печах. Приведенные варианты не исчерпывают описания всех практически встречающихся способов сочетания подвода к кольцевому и вывода из него горячего дутья.



Рис. 4. Подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу (а, б) и геометрия фурменных приборов (в)

Даны предложения по выбору рациональных вариантов подвода горячего дутья к «кольцевому» воздухопроводу, представленные на рисунках 5 и 6.

В случаях б, г, д, е, показанных, на рисунке 5, кольцевой воздухопровод лежит в одной плоскости с прямым, в отличие от в, где подвод горячего дутья выполнен под углом. Однако, целесообразно при проектировании новых и реконструкции существующих доменных печей использовать сочетания в, г и е, так как вероятность прямого попадания струи горячего дутья в полость фурменного прибора снижается.

Другой тип подвода, на рисунке 6 предполагает подвод горячего дутья сверху. Наиболее приемлемыми вариантами будут в и г. Геометрия фурменного прибора б гарантирует прямое попадание струи горячего дутья.

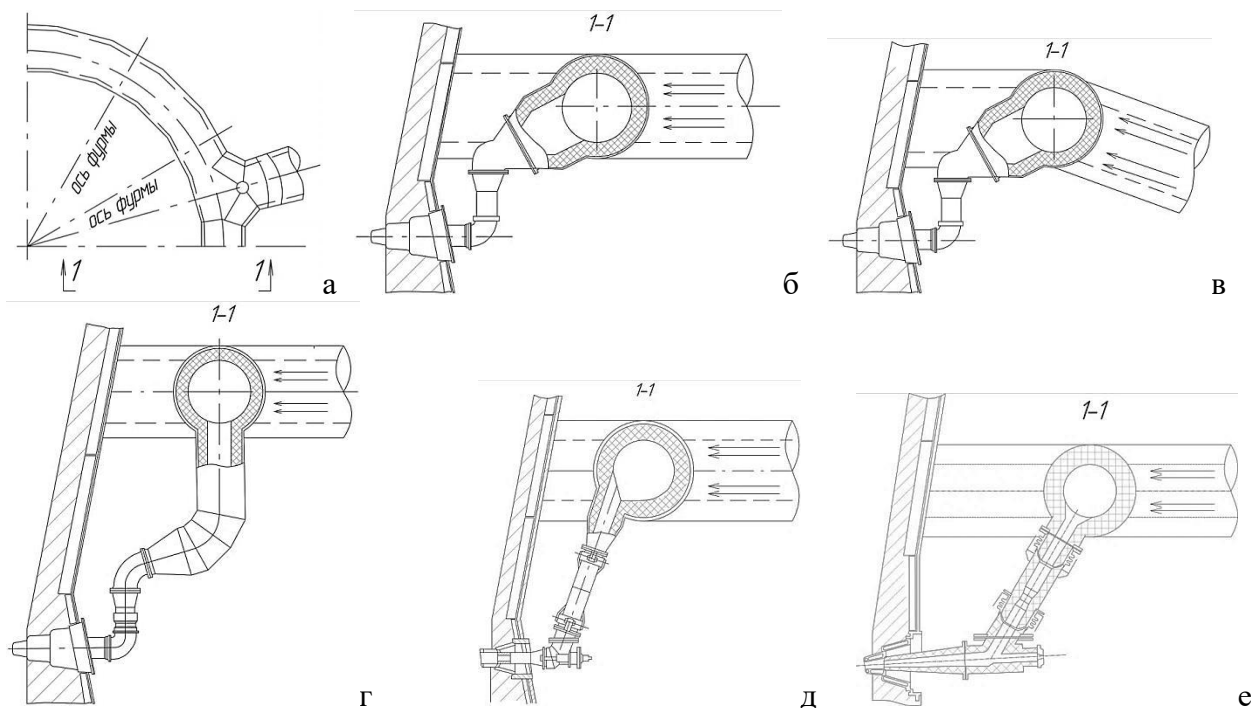


Рис. 5. Односторонний подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу:  
 а – прямой подвод горячего дутья; б, в, г – фурменные приборы типовой конструкции;  
 д – конструкция фурменного прибора «Гипромега»;  
 е – конструкция фурменного прибора фирмы «Paul Wurth»

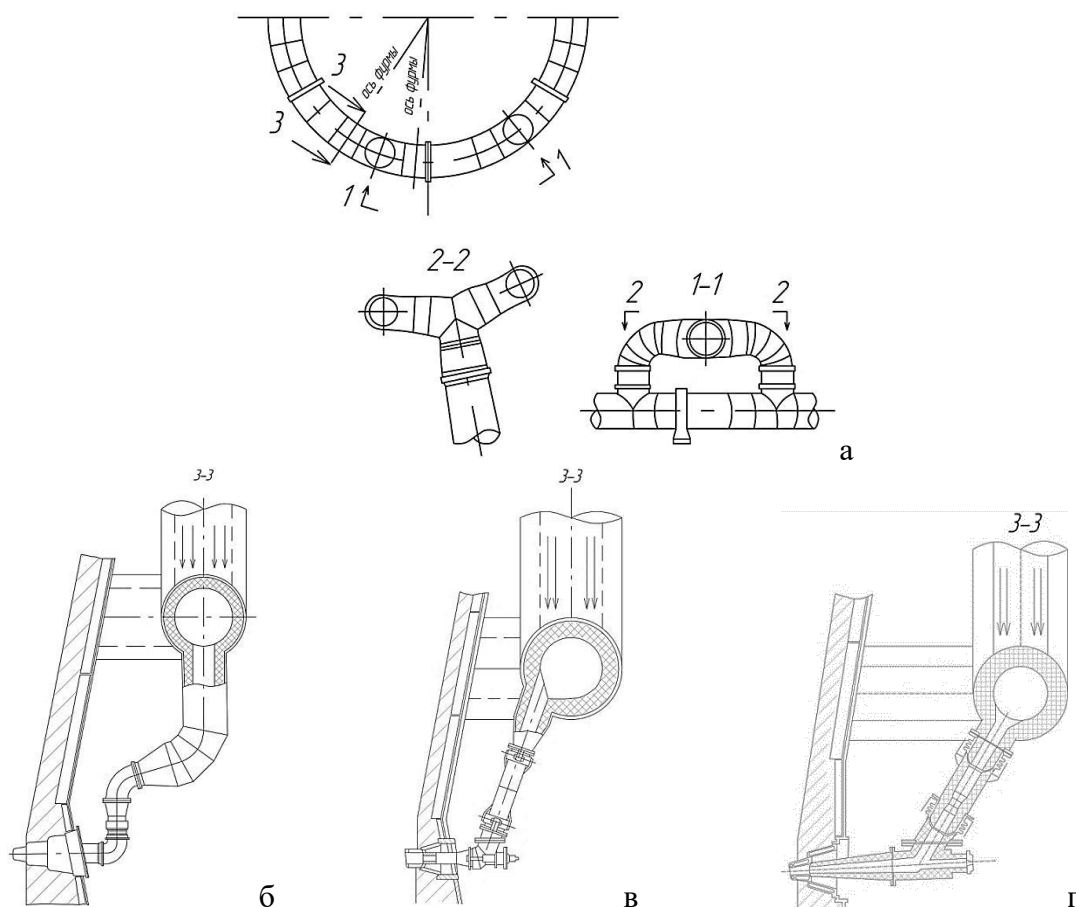


Рис. 6. Односторонний подвод (сверху) горячего дутья к кольцевому воздухопроводу с двумя патрубками: а – прямой подвод горячего дутья; б – фурменные приборы типовой конструкции; в – конструкция фурменного прибора «Гипромега»;  
 г – конструкция фурменного прибора фирмы «Paul Wurth»

Необходимо отметить, что врезка прямого воздухопровода в кольцевой осуществляется между фурмами, но чем больше полезный объем печи, тем меньше расстояние между осями воздушных фурм, а диаметры прямого и кольцевого воздухопроводов увеличиваются существенно. Поэтому становится очевидным, что с увеличением полезного объема печи больше вероятность прямого попадания части струи горячего дутья в конфузторы фурменных приборов.

Пока не реализован тангенциальный подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу на печах, предложено в секторах с повышенным расходом дутья (в местах врезки прямого воздухопровода и диаметрально противоположном ему) использовать воздушные фурмы (по 4 шт.) с увеличенным расстоянием места ввода природного газа от носка фурмы (500 мм и более), в остальных секторах – с обычным подводом (на расстоянии 250 мм от носка фурмы). Увеличение расстояния места ввода от носка фурмы с 250 до 500 будет способствовать росту времени пребывания природного газа в фурме, а значит, и степени полного сгорания его, повышения температуры газозвушной смеси, что приведет к увеличению объема и скорости истечения её. Сопротивление фурм проходу газозвушной смеси возрастет, расход дутья на них уменьшится, а в остальных – увеличится.

Наличие достоверной информации о расходе дутья позволяет организовать технологический контроль за равномерностью его поступления по фурмам. Точность измерения расходов дутья на отдельно взятую фурму можно повысить выбором рациональных мест отбора импульса, а также увеличением диаметра трубок магистрали с 0,5 до 1 дюйма.

#### Заключение

При проектировании новых и реконструкции существующих доменных печей необходимо уделять внимание подводу горячего дутья к кольцевому воздухопроводу.

Повышению равномерности распределения горячего дутья по фурмам доменных печей будет способствовать:

- оснащение доменных печей кольцевым воздухопроводом с тангенциальным подводом горячего дутья;
- рациональные сопряжения прямого воздухопровода с кольцевым и сочетания конструкции узла подвода горячего дутья к кольцевому и вывода его из кольцевого воздухопровода в фурменные приборы.

Контроль и регулирование распределения дутья по фурмам доменной печи представляют значительные возможности: по расходу дутья через фурмы можно судить об изменении газопроницаемости столба шихтовых материалов в определенном секторе доменной печи, а регулирование расхода дутья по фурмам дает возможность воздействовать на распределение газового потока, оперативно бороться с каналами и продувами.

#### Список использованных источников

1. Методы определения расхода горячего дутья на отдельно взятую фурму в горне доменной печи / В.Г. Дружков, М.Ю. Ширшов, И.Е. Прохоров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 2. – С. 21–27.
2. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Совершенствование конструкции узла подвода горячего дутья в «кольцевой» с целью повышения равномерности распределения дутья по окружности // Металлург. – 2016. – № 12. – С 39–43.
3. Ширшов М.Ю. Дружков В.Г. Влияние подвода горячего дутья в кольцевой воздухопровод на распределение его по фурмам доменной печи // ОАО «Черметинформация». Бюллетень НТиЭИ. Черная металлургия. – 2016. – №8. – С. 29–38.
4. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / В.И. Большаков. – Киев: Наукова думка, 2007. – 410 с.
5. Патент РФ на полезную модель №158168. Устройство для ввода горячего дутья в доменную печь. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Патентообладатель МГТУ им. Г.И. Носова. Опубликовано 20.12.2015 в БИ и ПМ № 35.